

# Model for Hydraulic Shovel Maintenance Planning Using Monte Carlo Simulation

## Modelo para la Planificación del Mantenimiento de Palas Hidráulicas Usando Simulación Monte Carlo

Vilchez-Torres M., MBA Ingeniera Industrial<sup>1</sup>, Oblitas-Cruz, J., Mgs. Ingeniero Agroindustrial<sup>2</sup>, Valcárcel-Bornas, R. Ingeniero Industrial<sup>3</sup>, Castillo-Bazán S., Ingeniera Industrial<sup>4</sup>, Pérez-Villena D., Ingeniero Industrial<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Primer a Quinto Autor Universidad Privada del Norte, Perú, karen.vilcheztorres@gmail.com, jimy.oblitas@upn.edu.pe, rvalcarcelbornas@gmail.com, sharoncastillo519@gmail.com, perezvillena@gmail.com

**Abstract** – *The research sought to generate a model using Monte Carlo Simulation, which allows predicting the mean time to repair (MTTR) and lost profits due to machine stoppage, two of the most important indicators for decision making in planning and programming maintenance, in this case to serve a fleet of 4 EX5500 model hydraulic shovels that operate in an open pit mining site, and that are high-cost equipment with a great impact on the extractive process. The model was developed on the Excel computer platform, managing to simulate the random behavior of the maintenance services, which determine the working times in the machine and, consequently, the detention of the equipment, whose penalty is reflected in the loss of profit. The model managed to project maintenance services with 67% success, from 180 iterations with 10 replications, estimating an MTTR of 375 hours per month, with an associated lost profit of 31,457,464 USD.*

**Key Words** – *MTTR, business interruption, Monte Carlo, planning, maintenance.*

**Resumen** – *La investigación buscó generar un modelo usando Simulación Montecarlo, que permita predecir el tiempo medio para reparar (MTTR) y el lucro cesante por parada de máquina, dos de los indicadores más importantes para la toma de decisiones en la planificación y la programación del mantenimiento, en este caso para atender a una flota de 4 palas hidráulicas modelo EX5500 que operan en un emplazamiento minero a tajo abierto, y que son equipos de alto costo y gran impacto en el proceso extractivo. El modelo se desarrolló sobre la plataforma informática de Excel, logrando simular el comportamiento aleatorio de los servicios de mantenimiento, que determinan los tiempos de trabajo en máquina y por consecuencia la detención de los equipos, cuya penalización se refleja en el lucro cesante. El modelo logró proyectar los servicios de mantenimiento con un 67% de aciertos, a partir de 180 iteraciones con 10 réplicas, estimando un MTTR de 375 horas al mes, con un lucro cesante asociado de 31 457 464 USD.*

**Palabras clave** – *MTTR, lucro cesante, Monte Carlo, planificación, mantenimiento.*

### I. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento es la estrategia orientada a asegurar la disponibilidad de los equipos y maquinarias para servir a los procesos de manera confiable y con el más alto nivel de rendimiento [1]. Históricamente mantenimiento y producción han tenido una relación de dependencia, debido a que los

trabajos de mantenimiento generan paradas de los procesos productivos que se traduce en lucro cesante, esta es una de las principales razones por las que se recomienda planificar el mantenimiento con orientación al costo [2], a su vez las decisiones de planificación y programación constituyen el eje para la mejora de la gestión del mantenimiento [3], de ahí la importancia de prestar atención tanto a los aspectos técnicos como administrativos del mantenimiento [1], desarrollando mecanismos de soporte a la toma de decisiones. Tomando en cuenta estos aspectos, el estudio aporta con el desarrollo de un modelo de simulación, usando el método de Monte Carlo, que permita predecir el tiempo medio para desarrollar los trabajos de mantenimiento (MTTR), de una flota de 4 palas hidráulicas EX4500 que operan en un emplazamiento minero, y el lucro cesante (L<sub>c</sub>) asociado, es decir, dos indicadores básicos para la toma de decisiones durante la planificación del mantenimiento, debido a que el MTTR muestra el resultado de la versatilidad del sistema para atender a la flota de manera oportuna, siendo el indicador que resume todos los esfuerzos del área de mantenimiento, por restituir los equipos en el menor tiempo posible a producción [4]; y el L<sub>c</sub>, que mide la penalidad por dejar de producir y percibir debido la parada de los equipos por el actuar del área de mantenimiento. El MTTR se mide usualmente en horas y varía en función al tipo de servicio que ingresa al departamento de mantenimiento, pero, predecir la demanda de servicios de mantenimiento mediante técnicas analíticas resulta complejo, en comparación a la simulación [5] y [6], que ha sido largamente utilizada con éxito, proporcionando valores aproximados [7] a través de modelos más intuitivos y fáciles de comprender por parte de los usuarios [6], [8] y [9], facilitando así la toma de decisiones y permitiendo el establecimiento de estrategias de mejora [7]. La generación de números aleatorios para simular el comportamiento probabilístico de las entradas de un modelo de simulación, se conoce como simulación de Monte Carlo [3], [5] y [6], es un método que ha demostrado tener alta fiabilidad al abordar sistemas complejos [3] y [10], y es el que mejor se adapta para simular la naturaleza aleatoria de la demanda de servicios de mantenimiento [10]. Existen varios programas informáticos para crear modelos de simulación Monte Carlo [6], pero en el estudio se opta por el uso de Excel, debido principalmente a su interfaz, que facilita el modelado de las entradas y salidas de los sistemas que se analizan, por la amplia

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.172>

**ISBN:** 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

gama de funciones lógicas y matemáticas que posee para simular las condiciones y variables de los sistemas, y por la posibilidad de generar números aleatorios uniformes de 0 a 1, importantes para este tipo de simulación [7] y [9].

## II. METODOLOGÍA Y TEORÍAS RELACIONADAS

No existe una metodología estándar para generar el diseño de un modelo de simulación, que depende del escenario que se pretende representar y del sistema informático que se esté usando [11], además se debe tener en cuenta que sus resultados son únicos para el sistema que se simula [6]. En el estudio se analizó y tomó como base, las metodologías de Mathur y Solow (autores que siguen siendo referentes, en cuanto a la comprensión de la simulación y la investigación de operaciones se refiere), y de Heizer y Render (autores más contemporáneos), sin embargo, también fue necesario complementar con actuales tendencias y recomendaciones de las metodologías de análisis de datos [12], logrando crear este modelo de simulación siguiendo los siguientes pasos:

### A. Clasificación del sistema

Se clasificó como un sistema de eventos discretos, debido a que los servicios no ingresan de manera continua, si no en determinados momentos en el tiempo, y de no terminación, ya que no tenemos un punto de inicio o término preciso, sin embargo, se pueden establecer cohortes de tiempo para un mejor análisis [11], en el estudio se hizo un cohorte de 6 meses.

### B. Identificación de los elementos del modelo

Los elementos del modelo dependen de los objetivos que se persiguen [12], en el estudio los valores de salida deseados fueron el MTTR por tipo de servicio y el  $l_c$  asociado, para lograr estas salidas fue necesario las siguientes entradas: pala que solicita el servicio, tipo de mantenimiento, y tipo y sub tipo de servicio.

### C. Tratamiento de la data

El desarrollo de un modelo de simulación predictivo depende de la calidad de la data [2] y [7], en el estudio la data proviene directamente del sistema informático donde se registran todos los actos de mantenimiento del total de flotas que operan en la empresa minera. El análisis permitió identificar 159 modalidades de servicios entre preventivos y correctivos, que se dieron a las 4 palas. Para un mejor manejo, estas modalidades fueron clasificadas y agrupadas en familias y tipos específicos de servicio por familia.

### D. Convertir la data en una distribución de probabilidad

Las solicitudes aleatorias de servicios de mantenimiento pueden convertirse a distribuciones de probabilidad, bajo el principio de que la demanda histórica es un buen predictor de la demanda futura, para ello se recurre a la construcción de tablas de frecuencia, básicas para desarrollar simulaciones tipo Monte Carlo en Excel. En la primera tabla,  $x_i$  estuvo dada por la variable pala con 4 categorías, y en la segunda tabla,  $x_i$  correspondió a la variable familia de servicios con 10 categorías. Lo siguiente fue calcular las frecuencias absolutas

( $f_i$ ), relativas ( $h_i$ ) y relativas acumuladas ( $H_i$ ) para cada categoría, y construir los intervalos, cuya longitud incluye a un conjunto de números aleatorios, que son representativos de cada categoría [6], quedando así cada una de ellas, listas para su posterior asociación con los números aleatorios.

### E. Diseño del modelo en Excel

La tabla de simulación inicia en la columna 1 con las Iteraciones (i). Se eligió simular un horizonte de 180 iteraciones, donde cada iteración representa una solicitud de servicio de mantenimiento. En la columna 2, se generó números aleatorios continuos en el rango de 0 a 1 para cada iteración del modelo, usando la función “=ALEATORIO ()”, luego en la columna 3 se simuló a la pala que solicita el servicio, esto se logró asociando los números aleatorios de la columna 2 a las categorías de la tabla de frecuencias de la variable palas, mediante la función “=BUSCARV ()”, que identifica a qué intervalo de la tabla de frecuencias pertenece el número aleatorio generado, y devuelve la categoría de la variable pala al que está asociado el intervalo [13]. Este mismo procedimiento se siguió en las columnas 6 y 7, donde se simuló la familia a la que pertenece el servicio solicitado. Para simular si el servicio era preventivo o correctivo, se generó en la columna 4, números aleatorios enteros binarios usando la función “=ALEATORIO.ENTRE(0;1)”, y en la columna 5 se asoció el valor “0” con el servicio preventivo, y el valor “1” con el correctivo mediante la función lógica “=SI(prueba lógica; valor si verdadero ;valor si falso)”, que permite hacer comparaciones entre valores y resultados deseados [14], como se muestra en la función a continuación: “=SI(F5=0;"Preventivo";"Correctivo)”. En la columna 8 se simuló el tipo de servicio específico asociado a cada familia, para esto fue necesario recurrir a un algoritmo construido por la función “=SI ()” descrita anteriormente, que permitió relacionar a cada celda de la columna 7, con una tabla matriz que contenía a cada familia de servicio como etiquetas en la primera fila, y a los tipos de servicio por familia en cada columna según correspondía, de modo que cada vez que la prueba lógica resultaba verdadera, es decir, se identificaba una coincidencia entre la celda de la columna 7 y la celda de la fila familia de servicio de la tabla matriz, el algoritmo, usando la combinación de la función “=INDICE ()” y la función “=ALEATORIO.ENTRE ()”, devolvía aleatoriamente un tipo de servicio específico de acuerdo a la familia correspondiente, la lógica usada se muestra a continuación: “=SI(pruebalógica;(INDICE(matriz;ALEATORIO.ENTRE(Rango);columna));SI.....”)). Es así como usando la metodología de Monte Carlo, se pudo asegurar el comportamiento probabilístico de las entradas de la simulación [6]. Con estos datos fue posible calcular el MTTR en la columna 9, usando la función “=SI ()”, que relacionó la familia de servicio de la columna 7 con el tiempo promedio en horas que dura cada uno de ellos, estos valores son promedios que usa la empresa. Cabe recalcar, que como en todo proceso de construcción de modelos de simulación, se ensayaron varias opciones hasta lograr una lógica en las entradas que permita las salidas deseadas [15]. Finalmente, para minimizar el error de estimación producto de la naturaleza aleatoria del modelo [10],

se procedió a hacer 10 réplicas de las 180 iteraciones, sin embargo, en simulación no existe un error aceptable, debido a que lo que se busca es una aproximación [5], en todo caso mientras menor sea el error, mayor precisión del modelo.

**F. Validación del modelo**

La confianza de las estadísticas de salida, dependen de la validez del modelo [9], que en el estudio se hizo a través del error del pronóstico siguiendo (1), el cual se produce por la varianza natural de los valores que arroja la simulación de Monte Carlo [10]:

$$e_t = y_t - y'_t \quad (1)$$

Donde:

- e<sub>t</sub>: error del pronóstico en el periodo t.
- y<sub>t</sub>: valor real en el periodo t.
- y'<sub>t</sub>: valor del pronóstico para el periodo t.

En el estudio se verificó la variación del MTTR, que es uno de los indicadores de interés, para tal fin se comparó las 25 últimas iteraciones del modelo, con las últimas 25 solicitudes de servicios de mantenimiento, que se separó de la data original y corresponden al último mes de información registrada, luego cada error de pronóstico o residual se elevó al cuadrado y los resultados fueron promediados con (2). Este método se prefirió a otros ya que penaliza errores grandes de pronóstico al elevarlos al cuadrado [10].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y'_t)^2 \quad (2)$$

Donde:

- MSE: error cuadrático.
- ∑: sumatoria del error del pronóstico.

**G. Cálculo de la estadística de salida**

Validado el modelo, es posible proyectar el l<sub>c</sub>, para esto, primero fue necesario calcular su valor por hora, y luego se multiplicó por los MTTR de salida del modelo. Para estimar el valor del lucro cesante por hora (l<sub>c</sub>/h), se siguió la siguiente metodología [16]. Cálculo del tiempo de ciclo de operación de la pala con (3):

$$C_m = C * tc \quad (3)$$

Donde:

- C<sub>m</sub>: Tiempo de ciclo (segundos).
- C: Tiempo de ciclo estándar (segundos).
- tc: Factor de conversión.

El tc, relaciona las condiciones de descarga y las condiciones de excavación, a su vez la condición de excavación se calcula dividiendo la profundidad de excavación y la profundidad máxima especificada, ver Tabla I:

TABLA I  
FACTOR DE CONVERSIÓN

Condiciones de excavación	Condiciones de descarga			
	Fácil	Normal	Bastante difícil	Difícil
< 40%	0.7	0.9	1.1	1.4
40 ~ 75%	0.8	1	1.3	1.6
> 75%	0.9	1.1	1.5	1.8

Luego se calculó la producción por ciclo usando (4):

$$q = (q^1) * (K) \quad (4)$$

Donde:

- q: Producción por ciclo (m<sup>3</sup>; yd<sup>3</sup>).
- q<sup>1</sup>: Capacidad de cucharón = 35.5 yd<sup>3</sup>.
- K: Factor de llenado de cucharón.

El volumen real dentro del cucharón (q<sup>1</sup>) varía según el material de carga, por eso se corrige con el factor K (Tabla II):

TABLA II  
FACTOR DE LLENADO DE CUCHARÓN (K)

Condiciones de Excavación		Factor
Buena	Suelo arcilloso, arcilla o suelo blando	1.0 ~ 1.1
Promedio	Suelo suelto con grava de pequeño diámetro	0.95 ~ 1.0
Bastante difícil	Roca bien volada	0.90 ~ 0.95
Difícil	Roca mal volada	0.85 ~ 0.90

Con estos valores fue posible calcular la producción hora de la pala mediante (5):

$$Q = (q) * \frac{3600}{C_m} * (E) \quad (5)$$

Donde:

- Q: Producción por hora (m<sup>3</sup>/h ó yd<sup>3</sup>/h).
- E: Eficiencia de trabajo.

La producción de la máquina (Q) depende de varios factores, de ahí que se corrige mediante un factor de aproximación de eficiencia E (Tabla III):

TABLA III  
EFICIENCIA DE TRABAJO (E)

Condiciones de Operación	Eficiencia
Buena	0.83
Promedio	0.75
Bastante pobre	0.67
Pobre	0.58

La producción en volumen, se transformó a masa con (6):

$$\vartheta = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Donde:

v: Q en m<sup>3</sup>/h

m: producción en masa por hora.

∂: densidad = a 1 570 kg/m<sup>3</sup> para un suelo 25% roca - 75% tierra.

Con una ley de producción de 0.96 gramos por tonelada métrica (gTm), se convirtió la masa de pulpa removida hora, por la recuperación de oro (Au) en gramos-hora (g/h), este paso es necesario para su transformación en onza-troy-hora (ozt/h), que es la medida que se usa para comercializar este metal, donde cada onza-troy equivale a 31.1 gramos [17], el resultado se multiplicó por el precio de mercado en dólares por onza-troy (USD/ozt), obteniendo de esta manera el costo de lucro cesante-hora (lc/h), el cual finalmente se incorporó como un dato determinístico al modelo de simulación, quedando así el modelo habilitado para proyectar el lc por cada intervención de mantenimiento.

### III. ESTUDIO DE CASO

El estudio de caso se desarrolló en una empresa minera aurífera dedicada a la gran minería a tajo abierto, específicamente en el área de mantenimiento que es el responsable de atender directamente a la flota de palas, por ser equipos de gran envergadura con alto impacto en el proceso de extracción del mineral. Respondiendo al diseño metodológico, en la Tabla IV se presenta las 10 familias de servicios que se obtuvieron en el proceso de agrupación, así como el total de tipos de servicios específicos asociados a cada una de ellas:

TABLA IV  
SERVICIOS DE MANTENIMIENTO POR FAMILIAS

Familias de servicios	Total de tipos de servicios específicos por familia
Sistema Hidráulico (SH)	37
Sistema Eléctrico (SE)	15
Inspecciones	21
Cambios	54
Soldaduras	10
Cortes	6
Fabricaciones	5
Reparaciones	4
Extracciones	3
Otros	4

La familia otros, incluye a servicios que no pudieron ser ubicados en los demás tipos.

Las tablas V y VI, muestran las tablas de frecuencias de las variables pala y familia de servicio:

TABLA V  
TABLA DE FRECUENCIAS PARA LA VARIABLE PALAS

Pala (x <sub>i</sub> )	Frecuencia absoluta (f <sub>i</sub> )	Frecuencia relativa (h <sub>i</sub> )	Frecuencia relativa acumulada (H <sub>i</sub> )	Intervalo	
1	42	0.30	0.30	0	0.30
2	28	0.20	0.51	0.30	0.51
3	38	0.28	0.78	0.51	0.78
4	30	0.22	1.00	0.78	1.00
Total	138	1.00			

TABLA VI  
TABLA DE FRECUENCIAS PARA LA VARIABLE FAMILIA DE SERVICIO

Familia de servicios (x <sub>i</sub> )	Frecuencia absoluta (f <sub>i</sub> )	Frecuencia relativa (h <sub>i</sub> )	Frecuencia relativa acumulada (H <sub>i</sub> )	Intervalo	
SH	37	0.23	0.23	0	0.23
Inspecciones	21	0.13	0.36	0.23	0.36
SE	15	0.09	0.46	0.36	0.46
Cambios	54	0.34	0.80	0.46	0.80
Soldaduras	10	0.06	0.86	0.80	0.86
Cortes	6	0.04	0.90	0.86	0.90
Fabricaciones	5	0.03	0.93	0.90	0.93
Reparaciones	4	0.03	0.96	0.93	0.96
Extracciones	3	0.02	0.97	0.96	0.97
Otros	4	0.03	1.00	0.97	1.00
Total	159	1.00			

A cada categoría le corresponde un intervalo con valores entre cero y uno. La Tabla VII muestra el modelo de 180 iteraciones, después de las 10 réplicas, con las 4 entradas aleatorias, que condicionan los valores de salida del MTTR:

TABLA VII  
MODELO DE PREDICIÓN DE SERVICIOS DE MANTENIMIENTO Y MTTR

i	Ale.	Pa la	Ale. Bin.	Mantenim iento	Ale.	Servicio		MTTR
						Famil ia	Tipo	
1	0.37	2	1	Correctivo	0.54	Camb ios	Mangue ra cilindro tensor.	20.23
2	0.75	3	0	Preventiv o	0.64	Camb ios	Bomba de Grasa	20.23
3	0.98	4	1	Correctivo	0.09	SH	Barrena do alojamiento pin F-brazo	7.35
4	0.89	4	1	Correctivo	0.65	Camb ios	Cambio Mangue ra Drenaje y Bombas	20.23

...	...	...	...	...	...	...	...	...
177	0.13	1	0	Preventivo	0.42	SE	Varilla de aceite motor LH P7	11.32
178	0.23	1	1	Correctivo	0.09	SH	Reparación tubería, cilindro, cucharón	7.35
179	0.07	1	0	Preventivo	0.11	SH	Esmerilado de alojamientos RH	7.35
180	0.26	1	1	Correctivo	0.65	Cambios	Cambiar manguera, ingreso microfiltrado	20.23

Si analizamos por ejemplo la iteración 1, vemos que el aleatorio 0.37 se ubica en el segundo intervalo de la Tabla V, que corresponde a la pala 2, tal como se muestra en la salida de la columna pala, del mismo modo el aleatorio 0.54 corresponde al intervalo de cambios de la Tabla VI. La misma correspondencia se aprecia en el aleatorio binario 1 y el mantenimiento correctivo, y la misma verificación se hizo para las salidas de tipo de servicio y MTTR.

Con esta información fue posible validar el modelo cuyos últimos 25 valores obtenidos tras las 10 réplicas, se muestran en la Tabla VIII:

TABLA VIII  
VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE ERROR DEL PRONÓSTICO

Iteración (i)	MTTR Real	MTTR Pronosticado	Error	Error <sup>2</sup>
1	20.23	20.23	0.0	0.0
2	20.23	20.23	0.0	0.0
3	20.23	20.23	0.0	0.0
4	11.32	11.32	0.0	0.0
5	20.23	11.32	8.9	79.5
6	20.23	20.23	0.0	0.0
7	7.35	11.32	-4.0	15.7
8	20.23	20.23	0.0	0.0
9	7.35	7.35	0.0	0.0
10	11.32	11.32	0.0	0.0
11	11.32	20.23	-8.9	79.5
12	7.35	11.32	-4.0	15.7
13	20.23	20.23	0.0	0.0
14	11.32	20.23	-8.9	79.5
15	20.23	20.23	0.0	0.0
16	7.35	7.35	0.0	0.0
17	7.35	20.23	-12.9	166.0

...	...	...	...	...
18	7.35	7.35	0.0	0.0
19	7.35	20.23	-12.9	166.0
20	20.23	7.35	12.9	166.0
21	11.32	11.32	0.0	0.0
22	7.35	7.35	0.0	0.0
23	20.23	20.23	0.0	0.0
24	20.23	7.35	12.9	166.0
25	20.23	20.23	0.0	0.0

Usando (2), se obtuvo:

$$MSE = \pm 37.36 \text{ h}$$

Con un nivel de 67% de aciertos. Siguiendo el procedimiento se pasó al cálculo del  $l_c$ . El tiempo de ciclo estándar usado por la empresa se muestra en la Tabla IX:

TABLA IX  
TIEMPO DE CICLO ESTÁNDAR DE LA PALA

Elemento de la actividad	Media (segundos)
Excavación	20
Giro con carga	7
Descarga	3.5
Retorno sin carga	8
Posicionamiento	6
Total	44.5

Las condiciones de descarga son bastante difíciles por el tipo de terreno rocoso en que trabajan las palas, y la relación de profundidad de excavación y profundidad máxima es de  $5/6=0.83$ , dando un  $t_c = 1.5$ , con estos datos el  $C_m$  estimado fue de:

$$C_m = 66.75 \text{ s}$$

Para el cálculo de la producción por ciclo se usó un factor  $K=0.9$ , que corresponde a las condiciones de excavación bastante difíciles, pero con roca bien volada, que es como deja la pulpa el área de voladura previo a las actividades de carguío y acarreo, por lo tanto:

$$q = 31.95 \text{ yd}^3$$

Para el factor de aproximación de eficiencia se consideró  $E=0.75$ , situando en un nivel promedio las condiciones de operación de las palas, obteniendo una producción hora por pala de:

$$Q = 1\,292.36 \text{ yd}^3/\text{h} \approx 988.66 \text{ m}^3/\text{h}$$

Que en masa equivale a:

$$m = 1\,552\,196\,200 \text{ g/h}$$

Es decir, por hora la recuperación de oro llega a:

$$\text{Au} = 1\,490.12 \text{ g/h} \approx 47.91 \text{ ozt/h}$$

A una cotización de 1 750.92 dólares la onza-troy, obtenemos un lucro cesante de:

$$l_c = 83\,886.57 \text{ USD/h}$$

Finalmente, el pronóstico del MTTR para un mes de proyección, considerando en promedio 25 solicitudes de servicios de mantenimiento, fue de 375 horas, lo que equivale a 31 457 464 dólares que la empresa deja de percibir por acciones de mantenimiento, de los cuales 36% correspondieron a correctivos. Así mismo 44% de las solicitudes de servicios fueron para la pala 3, seguido de un 28% de la pala 4. Otro dato adicional fue que el 52% de actividades de mantenimiento corresponden a la familia de cambios, seguido por 25% para servicios de la familia de mantenimientos hidráulicos y similar para los servicios de mantenimiento eléctrico.

#### IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como se pudo apreciar, gracias al modelo de simulación desarrollado, ahora es posible prever que el siguiente mes, el área de mantenimiento dedicará 375 horas en promedio, para atender las solicitudes de servicio provenientes de las 4 palas hidráulicas, con un impacto en los ingresos de 31 457 464 USD, y que estos servicios tienen una probabilidad de 67% que sucedan, y es que la simulación, al analizar sistemas complejos nos permite obtener una estimación de los posibles valores que se requiere determinar, mas no es un valor verdadero como el que se obtiene matemáticamente, pero es una buena aproximación para la toma de decisiones [8] y [10]. Podemos ver que con estos valores la empresa ya puede tomar una serie de decisiones sobre la planificación, como el recurso humano, materiales, repuestos, equipos, herramientas, presupuesto que podría necesitarse, etc [15]. Incluso ensayar situaciones que respondan a ¿Qué pasaría sí? [6], como por ejemplo que pasaría si se programa al personal en función de sus capacidades y habilidades para atender las necesidades de estos equipos, y proyectar su impacto en el MTTR. Vemos también que el modelo arroja información adicional relevante para la planificación, por ejemplo, ahora se hace evidente que la pala 3 está consumiendo el 44% de los servicios, eso conlleva al personal a plantearse preguntas como, si la recurrencia se debe a fallos en las acciones de mantenimiento, o deslindar de otros problemas imputables a la operación de la pala durante la producción, o a la evolución natural del desgaste del equipo, entre otras. Pasa lo mismo con las solicitudes de servicio de cambio, que como se ve es la más demandada, por lo tanto, otra decisión puede estar vinculada a perfeccionar las técnicas asociadas a este servicio. Es grande la lista de opciones que surgen a partir de cada resultado que arroja el modelo, lo importante es que permite alertar y tomar decisiones que luego se pueden ver reflejados en un menor MTTR, por lo tanto, mayor disponibilidad y mayor posibilidad de reducir pérdidas.

Algo importante mencionado por diversos investigadores, es que la predicción depende de la calidad de la información con la que se construye [2] y [7], en este sentido, creemos que el 67% de aciertos logrados, puede incrementar, si se alimenta el modelo con mayor data histórica, que en el estudio estuvo limitada a 6 meses; refrescando la data constantemente a medida que se va generando, y poder captar las distintas variaciones del sistema que se dan en el tiempo; incrementando las réplicas [15], tomando en cuenta que los resultados entre una simulación y otra varían, y tomarlas así puede conducir a toma de decisiones diferentes, de ahí la importancia, de replicar para obtener promedios con mejor aproximación; y mejorando las pautas de registro, ya que la agrupación de la información fue posible solo a nivel de familia de servicios, y aunque se intentó generar sub categorías por familia, no fue posible debido a la alta heterogeneidad encontrada en los registros. Finalmente a pesar que se requirió de varios intentos para lograr modelar las salidas deseadas, se puede decir que estamos ante un modelo base, que tiene muchas oportunidades de mejora, en cuanto a la complejidad de las necesidades del área de mantenimiento, de esta o cualquier empresa minera dedicada a la gran minería, un caso es el lucro cesante, el cual por temas de los registros disponibles, y la forma como la empresa organiza su información, se calculó como dato determinístico, pero como todo en la realidad, es un dato que es afectado por una serie de variables que le dan el carácter probabilístico, por citar algunos tenemos, las condiciones de operación y la estructura del terreno [16], o la ley y el precio de cotización de los metales. Respecto al programa informático a usar, existen varias alternativas para desarrollar simulaciones Monte Carlo, pero Excel sigue entre los favoritos de los usuarios, sin embargo, no consideramos que sea condicionante importante al momento de generar el modelo, y coincidimos con Franke et al, que sí lo es la data, y la capacidad para captar las condiciones replicables a través de los modelos [15]. Se espera que el estudio, genere interés por incorporar a la simulación como un medio para la toma de decisiones en la planificación del mantenimiento, debido a que poco se aprecia su uso en esta actividad, a pesar de su amplio y exitoso uso en otros actos como la planificación de la producción, los inventarios, las ventas, entre otros.

#### REFERENCIAS

- [1] B. G. Mwanza y C. Mbohwa, «Safety in Maintenance: An Improvement Framework», *Procedia Manuf.*, vol. 8, pp. 657-664, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.084.
- [2] O. Costello, M. D. Kent, y P. Kopacek, «Cost-Orientation Maintenance Engineering: Case Study of an Irish Manufacturing Plant», *IFAC-Pap.*, vol. 52, n.º 25, pp. 409-414, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.572.
- [3] M. Sedghi, O. Kauppila, B. Bergquist, E. Vanhatalo, y M. Kulahci, «A taxonomy of railway track maintenance planning and scheduling: A review and research trends», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 215, p. 107827, nov. 2021, doi: 10.1016/j.ress.2021.107827.
- [4] P. Alavian, Y. Eun, K. Liu, S. M. Meerkov, y L. Zhang, «The ( $\alpha$ ,  $\beta$ )-Precise Estimates of MTBF and MTTR: Definitions, Calculations, and Induced Effect on Machine Efficiency Evaluation», *IFAC-Pap.*, vol. 52, n.º 13, pp. 1004-1009, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.326.
- [5] S. Tindemans y G. Strbac, «Accelerating system adequacy assessment using the multilevel Monte Carlo approach», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189, p. 106740, dic. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106740.
- [6] J. Heizer y B. Render, *Dirección de la producción y de operaciones. Decisiones tácticas*, 11.ª ed. Madrid: Pearson, 2015.

- [7] F. Yu y C. P. Nielsen, «A data-driven approach for Decision-Making support of factory simulation solutions», *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 971-976, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.129.
- [8] A. Vologodskii, «When Computer Simulation Excels Experiment», *Biophys. J.*, vol. 110, n.º 10, pp. 2136-2137, may 2016, doi: 10.1016/j.bpj.2016.04.016.
- [9] N. Prajapat, T. Waller, J. Young, y A. Tiwari, «Layout Optimization of a Repair Facility Using Discrete Event Simulation», *Procedia CIRP*, vol. 56, pp. 574-579, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.10.113.
- [10] L. J. M. Aslett, T. Nagapetyan, y S. J. Vollmer, «Multilevel Monte Carlo for Reliability Theory», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 165, pp. 188-196, sep. 2017, doi: 10.1016/j.ress.2017.03.003.
- [11] K. Mathur y D. Solow, *Investigación de operaciones. El arte de la toma de decisiones*. México: Prectice-Hall Inc, 1996.
- [12] E. Medina, *Business intelligence: una guía práctica*, 2a. ed. Perú: Universidad de Ciencias Aplicadas, 2015.
- [13] Microsoft Soprte, «Función BUSCARV». 2022. Accedido: 13 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://support.microsoft.com/es-es/office/funci%C3%B3n-buscarv-0bbc8083-26fe-4963-8ab8-93a18ad188a1#:~:text=En%20su%20forma%20m%C3%A1s%20simple,TRUE%20o%200%2FFALSE>.
- [14] Microsoft Soprte, «SI (función SI)». 2022. Accedido: 13 de febrero de 2022. C. [En línea]. Disponible en: <https://support.microsoft.com/es-es/office/si-funci%C3%B3n-si-69aed7c9-4e8a-4755-a9bc-aa8bbff73be2#:~:text=La%20funci%C3%B3n%20SI%20es%20una,si%20la%20comparaci%C3%B3n%20es%20Falsa>.
- [15] S. Franke, F. Franke, y R. Riedel, «Robustness evaluation of production plans using Monte Carlo simulation», *Procedia Manuf.*, vol. 54, pp. 130-135, 2021, doi: 10.1016/j.promfg.2021.07.021.
- [16] Komatsu, *Specifications & Application Handbook*, 30.ª ed. Japón, 2009.
- [17] M. Muller, «Definición de quitales y onza troy», *OroyFinanzas*, 17 de marzo de 2011. <https://www.oroynfinanzas.com/2011/03/definicion-de-quitales-y-onzas-troy/> (accedido 24 de noviembre de 2021).